

УДК 524.338.5-86:524.54

МОРФОЛОГИЯ И КИНЕМАТИКА МЕЖЗВЕЗДНОГО ВЕЩЕСТВА В ОКРЕСТНОСТИ МОЛОДЫХ ЗВЕЗД ZZ Tau И ZZ Tau IRS

© 2023 А. В. Додин¹, С. Г. Желтоухов¹, С. А. Ламзин^{1*},
С. А. Потанин¹, Б. С. Сафонов¹, И. А. Страхов¹, А. М. Татарников¹

¹Государственный астрономический институт им. П. К. Штернберга Московского государственного университета имени М. В. Ломоносова, Москва, 119234 Россия

Поступила в редакцию 28 апреля 2023 года; после доработки 5 июня 2023 года; принята к публикации 15 июня 2023 года

Изучена морфология и кинематика вещества в окрестности молодых звезд ZZ Tau и ZZ Tau IRS. Найдено, что эмиссионная туманность (H α -волокно), расположенная юго-западнее этих звезд, и проецирующийся на нее объект Хербига–Аро HH 393 удаляются от ZZ Tau и ZZ Tau IRS с лучевой скоростью около 50 км с⁻¹. На внутренней кромке западной части H α -волокна находится более холодное волокно, от которого зарегистрировано излучение в линии молекулярного водорода ($\lambda = 2.12$ мкм) и излучение от пыли. В северо-восточной части исследуемой области обнаружен новый объект Хербига–Аро, которому был присвоен номер HH 1232. Заподозрено наличие еще нескольких новых эмиссионных туманностей. Электронная плотность в исследованных областях H α -волокна, а также HH 393 и HH 1232 $N_e \lesssim 100$ см⁻³. Приведены аргументы в пользу того, что запыленный дисковый ветер создал вокруг ZZ Tau IRS газопылевую туманность, вдоль оси симметрии которой находится джет, движущийся в направлении HH 393.

Ключевые слова: объекты Хербига–Аро — ISM: джеты и истечения — звезды: переменные: T Тельца, Хербига Ae/Be — звезды: индивидуальные: ZZ Tau, ZZ Tau IRS

1. ВВЕДЕНИЕ

В начале 50-х годов прошлого столетия в областях звездообразования были открыты компактные диффузные туманности с необычным эмиссионным спектром, отдельные из которых двигались со скоростью свыше 100 км с⁻¹ (Herbig and Jones, 1981). Позднее эти образования стали называть объектами Хербига–Аро (Herbig–Haro или HH objects) по именам открывших их астрономов. Оказалось, что эти туманности представляют собой яркие уплотнения в слабосветящихся узких биполярных струях газа (джетах), разлетающихся от молодых звездных объектов (Mundt and Fried, 1983). Наблюдаемая протяженность струй варьируется от 0.01 до 3 пк, а отношение наблюдаемой длины к ширине может достигать 30. Таких уплотнений в джетах может быть несколько, поэтому сейчас используют термин «течения Хербига–Аро» и обычно присваивают номер в каталоге не каждому вновь открытому объекту, а всему течению в целом (Reipurth, 2000; Reipurth and Bally, 2001). По-видимому, джеты образуются в результате коллимации так называемого магнитосферного ветра — истечения

вещества из области взаимодействия магнитосферы центрального объекта с внутренней областью аккреционного диска. В силу разных причин, и прежде всего нагрева атмосферы диска коротковолновым излучением центрального источника, с поверхности диска на расстояниях $r \gtrsim 10 R_*$ от звезд также происходит истечение вещества со скоростью порядка десятков км с⁻¹, но слабо коллимированное — дисковый ветер (Hartmann et al., 2016).

В конце 1970-х годов в окрестностях протозвезд и молодых звезд были обнаружены протяженные (от 0.1 до 10 пк) биполярные потоки холодного ($T \sim 30$ К) молекулярного газа, удаляющиеся от центрального источника со скоростью порядка нескольких десятков км с⁻¹. Первоначально эти потоки были обнаружены в радиолиниях молекулы CO (Snell et al., 1980), и, хотя позднее они наблюдались и в линиях других молекул, их по-прежнему называют CO-потоками. Поток массы, уносимый джетами, дисковым ветром и CO-потоками, обычно составляет порядка 10% темпа аккреции на центральный объект. В отличие от джетов CO-потоки слабо коллимированы: в первом приближении можно сказать, что они имеют конусообразную форму с углом раскрытия

*E-mail: lamzin@sai.msu.ru

от 20–30 до почти 180 градусов. Более полную информацию о параметрах, механизме возникновения и взаимосвязи джетов, дискового ветра и СО-потоков можно найти в обзорах (Cabrit, 2007; Bally, 2016; Beskin et al., 2023).

Потоки истекающего газа и порождаемые ими ударные волны влияют не только на морфологию областей звездообразования, но и на эффективность превращения вещества гигантских молекулярных облаков в звезды и планеты (Frank et al., 2014). По этой причине поиску и изучению новых НН-объектов и СО-потоков уделяется много внимания, особенно в близких к нам областях звездообразования, к числу которых относится и гигантское молекулярное облако в направлении созвездия Тельца (Taurus Molecular Cloud или сокращенно ТМС). В этой области было обнаружено более сотни НН-объектов (Reipurth, 2000), десятки СО-потоков и расширяющихся кольцеобразных структур молекулярного газа (пузырей) с радиусом от 0.3 до нескольких парсек, которые возникли в результате взаимодействия истекающего из протозвезд и молодых звезд газа с окружающей средой (Li et al., 2015; Duan et al., 2023).

Как правило, достаточно быстро удавалось выяснить, какой молодой звездный объект является источником истекающего газа, который приводит в движение вещество родительского молекулярного облака. Одним из немногих исключений являются СО-поток ТМО_32 (Heyer et al., 1987; Li et al., 2015) и объект Хербига–Аро НН 393 (Gomez et al., 1997), находящиеся в окрестности молодых звезд ZZ Tau и ZZ Tau IRS.

Напомним, что внутри молекулярного облака ТМС принято выделять две области с повышенной экстинкцией — облака ТМС 1 и ТМС 2 (см., например, рис. 1 в статье Bally et al., 2012). ZZ Tau и ZZ Tau IRS — классические звезды типа Т Тельца, расположенные в северо-восточной части ТМС 2. ZZ Tau — двойная система с орбитальным периодом 46.8 ± 0.08 лет и суммарной массой компонент $M = 0.86 \pm 0.09 M_{\odot}$ (Schaefer et al., 2014; Belinski et al., 2022). Примерно в $35''$ к югу от нее находится ZZ Tau IRS — молодая звезда с $M < 0.3 M_{\odot}$ (Hashimoto et al., 2021), окруженная протопланетным аккреционным диском, который мы видим почти с ребра (White and Hillenbrand, 2004). Цель данной работы — исследовать морфологию и кинематику околос звездного вещества в окрестности этих объектов.

2. НАБЛЮДЕНИЯ

Наблюдения в видимом и ближнем инфракрасном (ИК) диапазонах выполнялись на 2.5-м телескопе КГО ГАИШ МГУ, журнал наблюдений

Таблица 1. Журнал наблюдений

Фотометрические наблюдения		
Фильтр	Дата	Экспозиция, с
H α	2020/01/21	9 × 300
H α	2020/01/22	11 × 300
[S II]	2023/01/11	5 × 900
[S II]gc	2023/01/11	5 × 900
H ₂ 2.133 мкм	2021/02/11	23 × 96
K _{cont} 2.273 мкм	2021/02/11	16 × 96
Спектральные наблюдения		
Объект	Дата	Экспозиция, с
НН 393	2021/01/04	3 × 1200
НН 1232	2023/02/11	4 × 1200

приведен в таблице 1. Изображения окрестностей звезды ZZ Tau в узкополосных фильтрах получены с CCD камерой NBI¹, оснащенной двумя детекторами размером 2048 × 4102 пикселей ($5' 16'' \times 10' 34''$). В фильтре полосы H α наблюдения выполнялись 21–22 января 2020 года. Из-за недостаточно точного ведения телескопа была получена серия кадров с экспозициями 300 с, которые потом объединялись с учетом сдвига в одно изображение. В январе 2023 года были проведены более тщательные наблюдения с фильтром [S II]($\lambda 6716 + \lambda 6731$) и в соседнем континууме [S II]gc. Кривые пропускания фильтров представлены на сайте инструмента (см. сноску 1). Отдельные экспозиции в линиях и континууме делались поочередно, ведение телескопа корректировалось автогидирующим устройством.

Все кадры были скорректированы за темновой ток и плоское поле. Кадры плоских полей в фильтрах [S II] и [S II]gc получены по вечернему небу непосредственно перед началом наблюдений. Наблюдения выполнялись в темное время перед восходом Луны. Последняя экспозиция сделана на восходе Луны и показывает небольшое увеличение фона неба, поэтому мы вычитали фон неба перед усреднением кадров. Усреднение выполнялось путем вычисления медианного изображения из попарно средних (оценка Ходжеса–Лемана, см. Kobzar (2006)). Такой метод устраняет выбросы так же хорошо, как простая медиана, но имеет эффективность, близкую к простому среднему.

¹<https://obs.sai.msu.ru/cmo/sai25/wfi/>

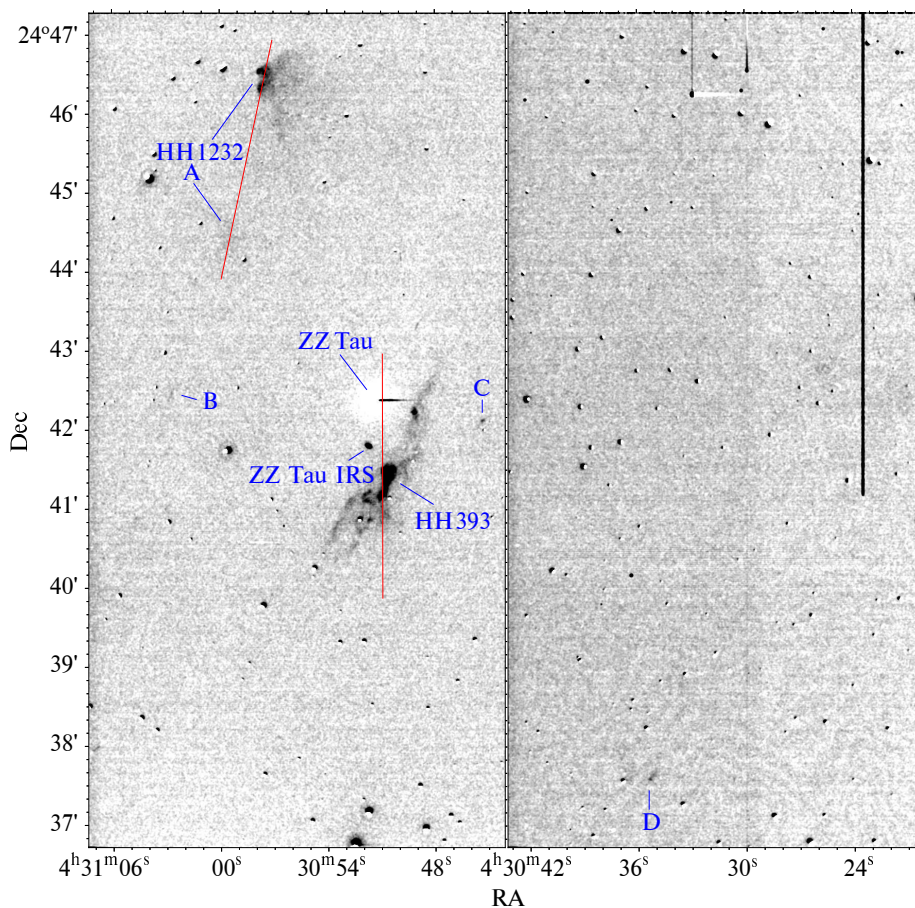


Рис. 1. Изображение окрестностей ZZ Тау в спектральных линиях [S II]($\lambda 6716 + \lambda 6731$) за вычетом континуума. Красные отрезки — положение щели спектрографа при получении спектров, показанных на рис. 2.

Спектральные данные получены с двухлучевым спектрографом TDS (Transient Double-beam Spectrograph)². Описание прибора и процедур обработки спектров приведено в статье Potanin et al. (2020). Все изучаемые в нашей работе линии сосредоточены в диапазоне длин волн 6400–7000 Å, где при ширине щели 1'' достигается спектральное разрешение 2500 ($FWHM = 120 \text{ км с}^{-1}$). Калибровка длин волн проводилась по лампе с последующей коррекцией по 35–38 эмиссионным линиям неба. Для красного канала остаточный разброс положений линий неба составляет 3–4 км с⁻¹, что определяет локальную точность калибровки. Приведенные значения разрешения и точности калибровки соответствуют равномерному заполнению ширины щели светом объекта, что близко к действительности в случае протяженных источников.

Мы не можем привести абсолютные интенсивности линий из-за неизвестных потерь света на узкой щели при наблюдении стандартов, поэтому спектры представлены в относительных единицах.

²<https://obs.sai.msu.ru/cmo/sai25/tds/>

Поскольку анализируемые линии расположены в узком диапазоне длин волн, неопределенность величины межзвездного поглощения не влияет на отношение интенсивностей линий.

Наблюдения в ближнем ИК-диапазоне проводились с использованием камеры ASTRONIRCAM (Nadjip et al., 2017). Изображения окрестностей ZZ Тау в узкополосном фильтре, центрированном на длину волны линии излучения молекулы водорода H₂ ($\lambda = 2.133 \text{ мкм}$, $FWHM = 46 \text{ нм}$) были получены 11 февраля 2021 года. Наблюдения проводились в режиме *дизеринга* — малых смещений телескопа между отдельными короткими экспозициями (23 экспозиции по 96 с каждая). В эту же дату были получены изображения в фильтре K_{cont} ($\lambda = 2.273 \text{ мкм}$, $FWHM = 39.4 \text{ нм}$), которые использовались для измерений потока в непрерывном спектре (16 экспозиций по 96 с каждая). Подробное описание работы камеры в фотометрическом режиме и процедуры первичной коррекции данных приведено в работе Tatarnikov et al. (2023).

3. РЕЗУЛЬТАТЫ

Изображение окрестностей ZZ Tau и ZZ Tau IRS с центром $RA \approx 04^h 31^m 35^s$, $Dec \approx +24^\circ 41'$ и размером, примерно равным $10' \times 10'$, в фильтрах, центрированных на линию $H\alpha$ и линии [S II] ($\lambda 6716 + \lambda 6731$), было получено Bally et al. (2012) (см. рис. 7.2 в указанной статье). На этом изображении видно протяженное (около $2'$) волокно, которое тянется с юго-востока на северо-запад, и рядом с ним ранее обнаруженный (Gomez et al., 1997) объект Хербига—Аро HH 393. Мы получили более глубокие изображения в тех же фильтрах этой же области примерно такого же размера, но с немного смещенным центром. На рис. 1 приведено полученное нами изображение, которое представляет собой разность изображений в фильтрах, центрированных на линии [S II] ($\lambda 6716 + \lambda 6731$) и близлежащем континууме. Центр этого изображения расположен примерно на 3.5 восточней и на $40''$ северней изображения (Bally et al., 2012).

На нашем изображении волокно выглядит несколько более протяженным, а его структура видна существенно лучше. Что касается объекта HH 393, то при сравнении нашего изображения с изображением, полученным Gomez et al. (1997) примерно 25 лет назад, мы не обнаружили ни изменения его морфологии, ни пространственного смещения.

В северо-восточной части нашего изображения в линиях [S II] (рис. 1) четко видна конусообразная эмиссионная туманность, которую Bo Reipurth счел возможным рассматривать как новый объект Хербига—Аро и внес в поддерживаемый им каталог объектов под номером HH 1232 с координатами $RA = 04^h 30^m 57^s.7$, $Dec = +24^\circ 46' 30''$. Кроме того, на этом изображении можно заподозрить наличие еще нескольких эмиссионных туманностей (объектов Хербига—Аро?), обозначенных на рис. 1 буквами А, В, С и D. Эти туманности едва видны, поэтому для подтверждения реальности их наличия требуется получить изображения с большей экспозицией. Отметим, впрочем, что туманности В, С и D также (едва) видны и на нашем изображении в линии $H\alpha$, на которое объект А, к сожалению, не попал. Еще одна интересная особенность нашего снимка — вытянутая форма изображения ZZ Tau IRS, о чем подробнее будет сказано в следующем разделе.

Для выяснения кинематики объектов HH 393 + волокно и HH 1232 нами были получены спектры с длинной щелью — см. рис. 2а, б, с и рис. 2д, е, ф соответственно. На рис. 2 видно, что эти туманности удаляются от нас со скоростями, достигающими до $+100 \text{ км с}^{-1}$. О распределении

интенсивности линий $H\alpha$, [S II] $\lambda 6716$ и $\lambda 6731$ вдоль щели, показанных на рис. 2с, ф, будет сказано в разделе 4. На щели спектрографа, проходящей через HH 1232, оказывается также и эмиссионная туманность А (см. рис. 1), однако ее спектра не видно — возможно, из-за недостаточно длинной экспозиции.

Расположенное к западу от ZZ Tau волокно, излучающее в линии молекулярного водорода с $\lambda = 2.12 \text{ мкм}$, было обнаружено 30 лет назад почти на пределе чувствительности — см. рис. 1 в работе Hodapp (1994). На полученном нами изображении в той же линии H_2 (см. рис. 3а) видно, что это ИК-волокно вполне реально и находится на внутреннем крае волокна, излучающего в линии $H\alpha$. Подчеркнем, что этого H_2 -волокна не видно на изображении, полученном в близлежащем континуме, поэтому на рис. 3а приведено изображение без вычитания континуума. Попытка получить спектр ИК-волокна для определения его лучевой скорости оказалась неудачной из-за слишком короткой (20 минут) экспозиции.

4. ОБСУЖДЕНИЕ

Сравнительно небольшая экстинкция в направлении на ZZ Tau АВ ($A_V \approx 1$ (Belinskii et al., 2022)) указывает на то, что эта двойная система лежит на внешнем, более близком к нам крае молекулярного облака ТМС 2. Об этом же свидетельствует и монополярность молекулярного СО-потока ТМО_32 — см. рис. 3с, — источником которого, вероятно, является именно ZZ Tau, а не ZZ Tau IRS (Belinski et al., 2022). Из данных Narayanan et al. (2012) следует, что движение молекулярного газа по направлению к облаку происходит с лучевой скоростью порядка нескольких км с^{-1} , а лучевая скорость самого облака в рассматриваемой области $V_r \approx +6 \text{ км с}^{-1}$. В этой же работе приведена и оценка возраста (пролетного времени) ТМО_32: $t_{\text{CO}} \approx 7 \times 10^4 \text{ лет}$.

Как было отмечено в предыдущем разделе, эмиссия в ИК-волокне в полосе К обусловлена не континуумом, а молекулярным водородом. В связи с этим несколько неожиданным оказалось, что на изображениях, полученных космической обсерваторией SPITZER (см. рис. 3б) в диапазоне от 3.5 до 6 мкм (Werner et al., 2004)³, волокно также заметно, хотя в этом диапазоне, по-видимому, излучает только пыль. При этом положение и морфология «молекулярного» и «пылевого» волокон практически совпадают (см. рис. 3). Более того, пылевое волокно наблюдается даже в полосе

³<https://irsa.ipac.caltech.edu/Missions/spitzer.html>

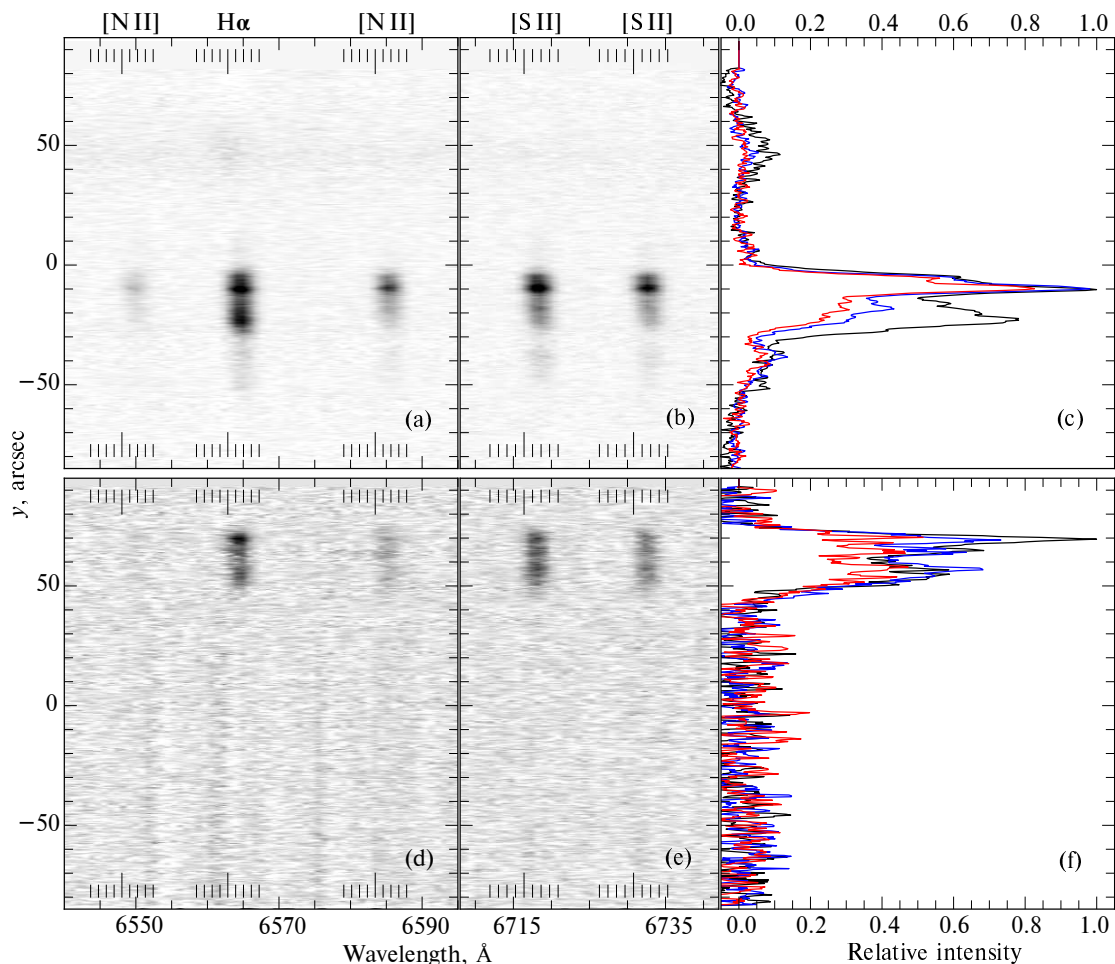


Рис. 2. Участки спектров для двух положений щели, показанных на рис. 1: панели (a), (b), (c) — HH 393 (точка наведения $RA = 4^{\text{h}}30^{\text{m}}50^{\text{s}}.94$, $Dec = 24^{\circ}41'25''$, $PA = 0^{\circ}$), панели (d), (e), (f) — HH 1232 (точка наведения $RA = 4^{\text{h}}30^{\text{m}}58^{\text{s}}.51$, $Dec = 24^{\circ}45'25''$, $PA = -12^{\circ}$). Длины волн даны в системе отсчета барицентра Солнечной системы. Лабораторные длины волн линий отмечены длинными черточками, короткие черточки соответствуют лучевым скоростям с шагом 50 км с^{-1} . По вертикальной оси — расстояние вдоль щели в угловых секундах. На панелях (a)–(c) в районе $y = 50''$ виден рассеянный свет от ZZ Tau. На панелях (c) и (f) показано, как меняется вдоль щели интенсивность линий $H\alpha$ (черная кривая), $[S II] \lambda 6716$ (синяя кривая) и $[S II] \lambda 6731$ (красная кривая), проинтегрированная по диапазону скоростей от -30 до $+200 \text{ км с}^{-1}$. Графики нормированы на максимум линии $H\alpha$.

8 мкм, и если оно излучает как черное тело, то по нашей оценке температура его пыли $T \approx 480 \text{ К}$. Пользуясь случаем, обратим внимание на то, что в диапазоне от 3.6 до 5.8 мкм ZZ Tau IRS заметно ярче, чем ZZ Tau, хотя в видимом и ближнем ИК-диапазонах ситуация обратная — качественно об этом можно судить и по нашему рисунку, а для количественного сравнения см. работы Hashimoto et al. (2021) и Belinski et al. (2022).

Лучевые скорости ZZ Tau IRS и центра масс двойной системы ZZ Tau AB, по-видимому, лежат в интервале от $+15$ до $+20 \text{ км с}^{-1}$ (Belinski et al., 2022; Kounkel et al., 2019). Таким образом, из рис. 2 следует, что объект Хербига–Аро HH 393 и $H\alpha$ -волокну удаляются не только от нас, но и от этих звезд с лучевой скоростью $V_r^{\text{HH}} \sim 50 \text{ км с}^{-1}$,

двигаясь по направлению к молекулярному облаку ТМС 2. Хорошо заметный наклон всех спектральных линий на рисунке указывает на градиент лучевой скорости вдоль направления щели: «красное смещение» нарастает в направлении с севера на юг. Как мы увидим далее, резонно полагать, что HH 393 связан с ZZ Tau IRS, от которой находится примерно в $15''$, а при расстоянии до ТМС 2 около 140 пк (Akeson et al., 2019) это соответствует расстоянию $\Delta r \sim 2 \times 10^3 \text{ а. е.}$ Отсюда получаем, что пролетное время (возраст) HH 393 $t_{\text{HH}} \sim \Delta r / V_r^{\text{HH}} \sim 300 \text{ лет}$, что гораздо меньше времени t_{CO} .

Из рис. 2с следует (см. также рис. 1), что в самой яркой области HH 393 и на южной границе волокна интенсивности линий $H\alpha$ и $[S II]$ примерно

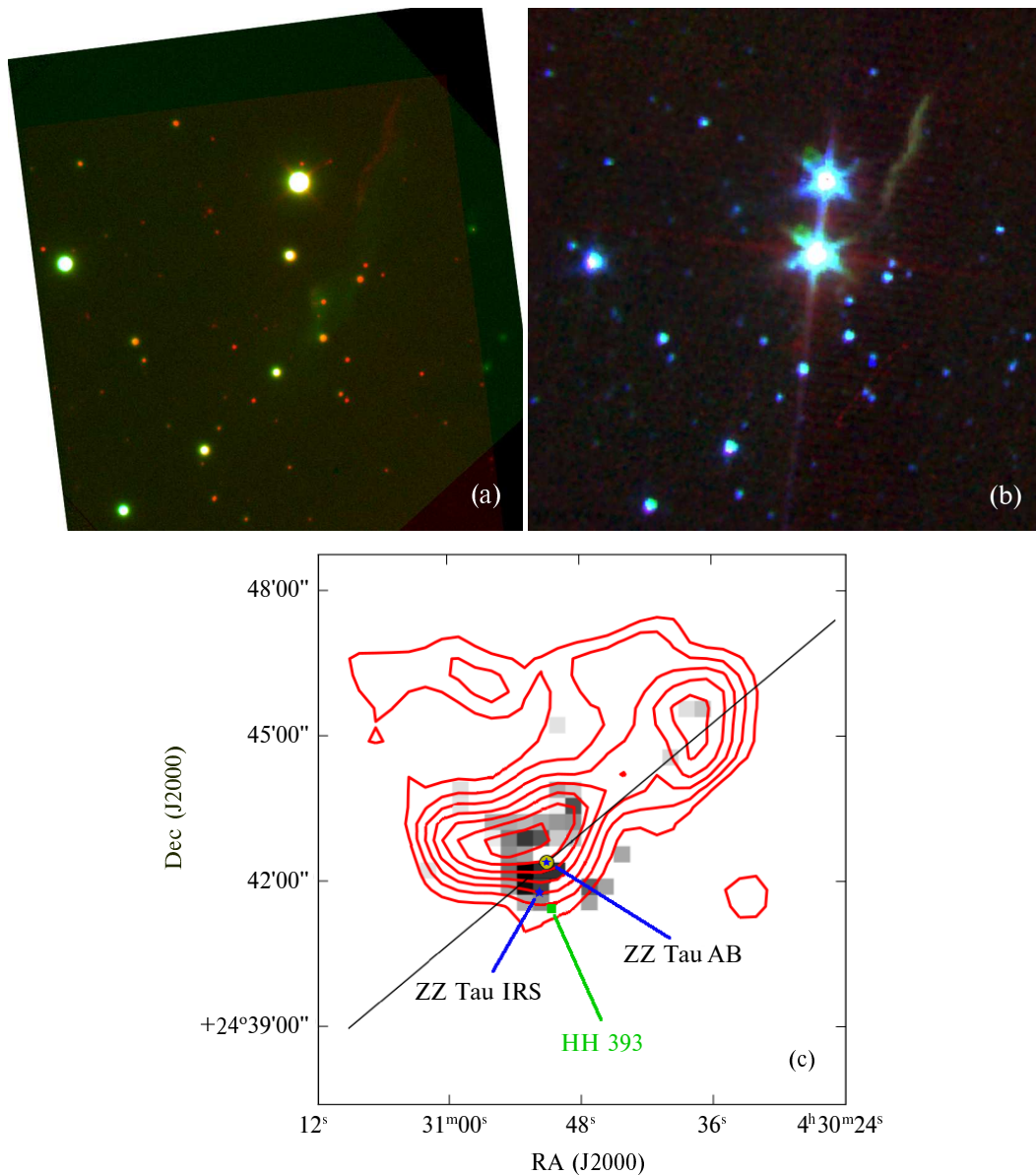


Рис. 3. Панель (а) — комбинация полученных нами изображений в линии $H\alpha$ (зеленый цвет) и линии молекулярного водорода 2.12 мкм (красный цвет). Панель (б) — комбинация изображений той же области, полученных обсерваторией SPITZER в полосах 3.6 мкм (синий), 4.5 мкм (зеленый) и 5.8 мкм (красный), взятых из базы данных NASA/IPAC Infrared Science Archive (см. сноску 3). Панель (с) — линии равной скорости монополярного CO-потока TMO_32, согласно рис. 27 из работы Narayanan et al. (2012); черной линией показана ось потока.

одинаковы, а в промежутке между ними линия $H\alpha$ заметно ярче линий серы. Линия [S II] $\lambda 6716$ везде примерно на 20–30% интенсивней линии [S II] $\lambda 6731$, а значит, электронная плотность газа N_e в соответствующих областях примерно одинакова: согласно Proxauf et al. (2014), $N_e \lesssim 100 \text{ cm}^{-3}$, как и в случае HH 1232 — см. рис. 2f. Как видно на этой панели, здесь линия $H\alpha$ тоже всегда ярче линий серы, хотя и в различной степени вдоль щели. Отметим, что интенсивность линий [S II] может превышать интенсивность линии $H\alpha$ только в

тех объектах Хербига–Аро, которые порождаются ударными волнами со скоростью фронта порядка нескольких десятков km s^{-1} , и у которых по этой причине водород перед фронтом почти не ионизован (Dopita and Sutherland, 2017).

Наших данных явно недостаточно для того, чтобы понять, является ли HH 393 частью $H\alpha$ -волокна или просто проецируется на него. Необходимо провести либо дополнительные наблюдения с интерферометром Фабри–Перо, либо спектральные наблюдения при различных положе-

ниях щели, а также обнаружить и измерить движение исследуемых туманностей в тангенциальном направлении. Укажем в этой связи, что отмеченная в разделе 3 неизменность положения и морфологии HH 393 на интервале свыше двух десятков лет не характерна для объектов Хербига–Аро (Reipurth and Bally, 2001).

Как отмечалось в разделе 3, изображение ZZ Tau IRS на рис. 1 отличается от изображений других звезд, что более отчетливо видно на рис. 4. На панели (а) этого рисунка в увеличенном масштабе показано изображение ZZ Tau IRS в фильтре [S II], из которого вычтено изображение в близлежащем континууме, что почти не изменило его вида. Это связано с большой эквивалентной шириной (EW) линий [S II] ($\lambda 6716 + \lambda 6731$) в спектре звезды — 117 \AA (White and Hillenbrand, 2004). Отметим, что аномально большие значения EW имеют и другие запрещенные линии в спектре ZZ Tau IRS, но $EW_{H\alpha} \approx 240 \text{ \AA}$!

Как полагают White and Hillenbrand (2004), причина в том, что на самом деле мы видим не звезду, а ее свет, рассеянный на околозвездной пыли, к которому добавляется излучение джета (прямое и/или рассеянное на пыли), — саму звезду загораживает диск. Вытянутость изображения ZZ Tau IRS (для сравнения на рис. 4b показано изображение соседней яркой звезды в том же фильтре без вычитания континуума) можно объяснить, если рассеяние происходит на стенках полости, образованной запыленным дисковым ветром, вдоль оси которой расположен джет.

На рис. 4d показан ожидаемый вид звезды, окруженной диском, с поверхности которого «дует» запыленный ветер, при наклоне оси вращения диска к лучу зрения $i = 60^\circ$. Модель была рассчитана нами с помощью пакета MC3D (Wolf, 2003), причем параметры диска и ветра мы подобрали так, чтобы оптическая толщина в направлении на звезду на длине волны 1.6 мкм была равна 10. Модель имеет исключительно иллюстративный характер, поскольку «расчетное» изображение довольно похоже на неопубликованное изображение ZZ Tau IRS, которое было получено 8 августа 2017 г. на космическом телескопе им. Хаббла (HST) с помощью камеры WFC3/IR в фильтре F160W ($\lambda_0 = 1.55 \text{ мкм}$)⁴ — см. рис. 4с. Для увеличения контраста изображения и устранения дифракционных «лучей» мы из оригинального изображения вычли модель точечного источника, построенную по трем ближайшим ярким звездам, и произвели сглаживание двумерным гауссовским профилем.

⁴PI: T. Megeath, Proposal ID:14181, <https://mast.stsci.edu>

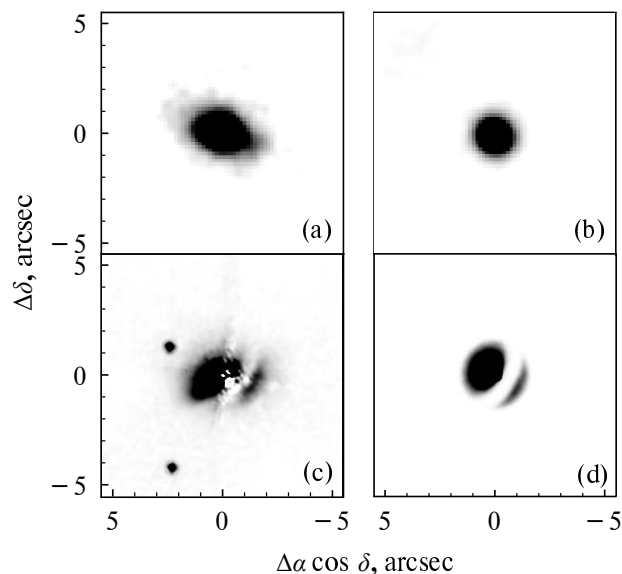


Рис. 4. (а) — изображение ZZ Tau IRS в спектральных линиях [S II] ($\lambda 6716 + \lambda 6731$) за вычетом континуума, (b) — изображение близкой яркой звезды в линиях [S II] (для сравнения), (c) — изображение с HST на длине волны 1.6 мкм, (d) — модель. Промежуток между «половинками» изображений на панелях (c) и (d) — тень от диска. Подробности в тексте.

Изображения на панелях (а) и (с) рис. 4 более или менее симметричны относительно направления с $PA \approx 64^\circ$, которое заметно отличается от направления малой оси эллипсоидального изображения протопланетного диска ZZ Tau IRS ($PA \approx 45^\circ$), полученного Hashimoto et al. (2021) на интерферометре ALMA. Однако из теории следует, что джет должен быть направлен вдоль оси вращения областей диска с радиусом, не превышающим 1 а. е., и не разрешаемых интерферометром ALMA, которые зачастую наклонены к внешним областям под заметным углом (Andrews, 2020). Иными словами, приведенные на рис. 4 изображения околозвездной (газопылевой) туманности, действительно, могут быть изображением каверны, созданной запыленным дисковым ветром. В таком случае джет, а точнее контрджет, ZZ Tau IRS оказывается направленным на HH 393.

В связи с вышесказанным обратим внимание на гипотетические туманности А и D на рис. 1. Они лежат на прямой с $PA \approx 39^\circ$, которая проходит вблизи ZZ Tau IRS, и удалены от нее примерно на 3.2 и 5.7 соответственно, причем прямая, соединяющая ZZ Tau IRS и туманность D, проходит через HH 393. На этом основании можно предположить, что туманности А и D — это объекты Хербига–Аро, связанные с джетом ZZ Tau IRS. В таком случае линии в их спектрах должны иметь противоположное доплеровское смещение:

в коротковолновую область у туманности А и в длинноволновую область у туманности D. Будущие наблюдения покажут, так ли это. Вопрос об источнике HH 1232 мы пока оставляем открытым.

5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Наши исследования показали, что кинематика газа в окрестности ZZ Tau и ZZ Tau IRS имеет нетривиальный характер, и позволили обнаружить новый объект Хербига—Аро HH 1232. Не исключено, что полученные нами результаты имеют более широкий контекст. По мнению Furlan et al. (2011), ZZ Tau AB и ZZ Tau IRS образуют широкую иерархическую тройную систему. Расстояние между этими объектами в проекции на небо около 35", что в линейной мере соответствует примерно 5 000 а. е. К сожалению, астрометрические данные Gaia не позволяют решить вопрос о возможной связанности этих объектов из-за большой ошибки определения их параллакса и собственного движения: $RUWE = 6.64$ и 2.49 соответственно (Prusti et al., 2016; Brown et al., 2021). Было бы интересно выяснить, не связано ли обнаруженное нами крупномасштабное движение газа в окрестности ZZ Tau и ZZ Tau IRS с процессом совместного рождения этих объектов с последующим распадом тройной системы. Для ответа на этот вопрос следует получить более глубокие изображения изучаемой области, чтобы подтвердить наличие внутри нее новых объектов Хербига—Аро и определить их лучевые скорости, а также тангенциальные скорости всех эмиссионных туманностей.

БЛАГОДАРНОСТИ

Мы благодарим сотрудников КГО за помощь при проведении наблюдений, Т. Ю. Магакяна за полезные обсуждения и Во Reipurth за внесение открытого нами объекта Хербига—Аро в общий каталог объектов этого типа с присвоением ему номера HH 1232. С благодарностью отмечаем, что при выполнении работы мы использовали базу данных SIMBAD (CDS, Strasbourg, France), Astrophysics Data System (NASA, USA) и NASA/IPAC Infrared Science Archive (California Institute of Technology).

ФИНАНСИРОВАНИЕ

Работа основана на наблюдательных данных, полученных в Кавказской горной обсерватории ГАИШ МГУ имени М. В. Ломоносова с помощью научного оборудования, частично приобретенного за счет средств Программы развития Московского государственного университета имени М. В. Ломоносова. Работа А. Д. (наблюдения, редукция данных, интерпретация), С. Л. (интерпретация), Б. С. (наблюдения, интерпретация), И. С. (наблюдения) выполнена при финансовой поддержке Российского научного Фонда (грант № 20-72-10011).

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. R. L. Akeson, E. L. N. Jensen, J. Carpenter, et al., *Astrophys. J.* **872** (2), article id. 158 (2019).
2. S. M. Andrews, *Annual Rev. Astron. Astrophys.* **58**, 483 (2020).
3. J. Bally, *Annual Rev. Astron. Astrophys.* **54**, 491 (2016).
4. J. Bally, J. Walawender, and B. Reipurth, *Astron. J.* **144** (5), article id. 143 (2012).
5. A. Belinski, M. Burlak, A. Dodin, et al., *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **515** (1), 796 (2022).
6. V. S. Beskin, V. I. Krauz, and S. A. Lamzin, *Physics Uspekhi* **66** (4), 327 (2023).
7. A. G. A. Brown et al. (Gaia Collab.), *Astron. and Astrophys.* **649**, id. A1 (2021).
8. S. Cabrit, *Proc. IAU Symp.* No. 243, Ed. by J. Bouvier and I. Appenzeller (Cambridge Univ. Press, Cambridge, 2007) p. 203.
9. M. A. Dopita and R. S. Sutherland, *Astrophys. J. Suppl.* **229** (2), article id. 35 (2017).
10. A. Frank, T. P. Ray, S. Cabrit, et al., *Protostars and Planets VI*, Ed. by H. Beuther, R. S. Klessen, C. P. Dullemond, and T. Henning (University of Arizona Press, Tucson, 2014), p. 451.
11. E. Furlan, K. L. Luhman, C. Espaillat, et al., *Astrophys. J. Suppl.* **195**, article id. 3 (2011).
12. M. Gomez, B. A. Whitney, and S. J. Kenyon, *Astron. J.* **114**, 1138 (1997).
13. L. Hartmann, G. Herczeg, and N. Calvet, *Annual Rev. Astron. Astrophys.* **54**, 135 (2016).
14. J. Hashimoto, R. Dong, and T. Muto, *Astron. J.* **161** (6), id. 264 (2021).
15. G. H. Herbig and B. F. Jones, *Astron. J.* **86**, 1232 (1981).
16. M. H. Heyer, R. L. Snell, P. F. Goldsmith, and P. C. Myers, *Astrophys. J.* **321**, 370 (1987).
17. K.-W. Hodapp, *Astrophys. J. Suppl.* **94**, 615 (1994).
18. A. Kobzar, *Applied Mathematics statistics. For engineers and scientists workers* (Fizmatlit, Moscow, 2006) [in Russian].
19. M. Kounkel, K. Covey, M. Moe, et al., *Astron. J.* **157** (5), article id. 196 (2019).
20. H. Li, D. Li, L. Qian, et al., *Astrophys. J. Suppl.* **219** (2), article id. 20 (2015).
21. R. Mundt and J. W. Fried, *Astrophys. J.* **274**, L83 (1983).
22. A. E. Najjip, A. M. Tatarnikov, D. W. Toomey, et al., *Astrophysical Bulletin* **72** (3), 349 (2017).
23. G. Narayanan, R. Snell, and A. Bemis, *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **425** (4), 2641 (2012).
24. S. A. Potanin, A. A. Belinski, A. V. Dodin, et al., *Astronomy Letters* **46** (12), 836 (2020).
25. B. Proxmauf, S. Öttl, and S. Kimeswenger, *Astron. and Astrophys.* **561**, id. A10 (2014).

26. T. Prusti et al. (Gaia Collab.), *Astron. and Astrophys.* **595**, id. A1 (2016).
27. B. Reipurth, *VizieR Online Data Catalog V/104* (2000).
28. B. Reipurth and J. Bally, *Annual Rev. Astron. Astrophys.* **39**, 403 (2001).
29. R. L. Snell, R. B. Loren, and R. L. Plambeck, *Astrophys. J.* **239**, L17 (1980).
30. A. M. Tatarnikov, S. G. Zheltoukhov, N. Shatsky, et al., *Astrophysical Bulletin* **78** (3), 384 (2023).
31. M. W. Werner, T. L. Roellig, F. J. Low, et al., *Astrophys. J. Suppl.* **154** (1), 1 (2004).
32. R. J. White and L. A. Hillenbrand, *Astrophys. J.* **616**, 998 (2004).
33. S. Wolf, *Computer Physics Communications* **150** (2), 99 (2003).

Morphology and Kinematics of Interstellar Matter in the Vicinity of Young Stars ZZ Tau and ZZ Tau IRS

A. V. Dodin¹, S. G. Zeltoukhov¹, S. A. Lamzin¹, S. A. Potanin¹, B. S. Safonov¹, I. A. Strakhov¹, and A. M. Tatarnikov¹

¹Sternberg Astronomical Institute, Moscow State University, Moscow, 119234 Russia

The morphology and kinematics of the matter in the vicinity of young stars ZZ Tau and ZZ Tau IRS are studied. It has been found that the emission nebula (the H α filament) located southwest of these stars, as well as the Herbig–Harro object HH 393 projected onto it are moving away from ZZ Tau and ZZ Tau IRS with a radial velocity of about 50 km s⁻¹. On the inner edge of the western part of the H α filament, there is a cooler filament emitting in the molecular hydrogen line ($\lambda = 2.12 \mu\text{m}$) and in the dust continuum. In the northeastern part of the studied region, a new Herbig–Harro object is discovered and assigned the number HH 1232. The presence of several more new emission nebulae is suspected. The electron density in the studied regions of the H α filament, as well as HH 393 and HH 1232 $N_e \lesssim 100 \text{ cm}^{-3}$. Arguments are presented in favor of the fact that the dusty disk wind has created a gas-and-dust nebula around ZZ Tau IRS, along the symmetry axis of which there is a jet moving in the direction of HH 393.

Keywords: *Herbig–Harro objects—ISM: jets and outflows—stars: variable: T Tauri, Herbig Ae/Be—stars: individual: ZZ Tau, ZZ Tau IRS*